

УДК 629.7.064.3

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ И КАЧЕСТВЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ГИДРОТОПЛИВНЫХ МЕЛКОКАПИЛЛЯРНЫХ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОВ

В.Г. КОМАРОВ, Р.Г. ТИМИРКЕЕВ

В статье рассмотрена физическая природа ультразвуковой очистки мелкокапиллярных фильтроэлементов гидравлических и топливных систем современных воздушных судов. Физическая сущность процессов очистки фильтроэлементов заключается во влиянии частоты колебаний газовых пузырьков моющей жидкости на эффективность односторонней диффузии газов и на течение вязкопластичного слоя загрязнений фильтроэлементов.

**Ключевые слова:** фильтроэлемент, энергия кавитационных пузырьков, кумулятивная струйка жидкости, касательное напряжение в вязкопластичном слое.

Эффективность ультразвуковой очистки объясняется многими факторами (кавитация, диффузия, массообмен, микропотоки и т.д.), но для очистки мелкопористых фильтроэлементов особую роль играет процесс диффузии, описываемый законом Фика

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \Delta S D_{\Gamma} \partial \rho_{\Gamma} / \partial y, \quad (1)$$

где  $m$  - масса диффундируемого газа;

$\Delta S$  - площадь контакта газа с жидкостью;

$D_{\Gamma}, \partial \rho_{\Gamma}$  - коэффициент диффузии и плотность газа;

$\partial y$  - координата.

Для интенсификации процесса очистки, обеспечивающего качественную ультразвуковую очистку фильтроэлементов, необходимо рассмотреть его кинетику.

Очистка пористо-капиллярных фильтроэлементов в ультразвуковом поле имеет специфические особенности, заключающиеся в том, что, во-первых, максимальный (резонансный) размер кавитационных пузырьков существенно больше размеров капилляров. Например, при частоте 20 кГц этот резонансный размер, как показывает теория и эксперимент, равен 100-200 мкм [1]. Во-вторых, в пористом материале газовыделение облегчено, что препятствует эффективному проходу ультразвуковой энергии непосредственно в капилляры. В-третьих, из-за высоких температур рабочих жидкостей чаще всего осадок в капиллярах представляет собой вязкую смесь твердых микрочастиц продуктов износа и продуктов окисления органических рабочих жидкостей, образующих вязкопластичную массу.

Известно, что при колебаниях пузырька в ультразвуковом поле наблюдается эффект «выправленной» диффузии растворенных в жидкости газов внутрь пузырька из-за того, что его поверхность в период расширения больше, чем в период сжатия. Оценим средний результат действия ультразвуковой волны в каждый период колебаний. Тогда вместо мгновенных значений  $P_a \sin \omega t$ , где  $\omega$  - круговая частота ультразвука, можно использовать среднее эффективное значение амплитуды звукового давления  $\bar{P}_a$ . Предположим, что размер колеблющегося пузырька в капиллярах фильтра равен их размеру  $R_{\phi}$  со средними значениями амплитуд  $\Delta R'_{\phi}$  и  $\Delta R''_{\phi}$  в период расширения и сжатия соответственно. Тогда условие механического равновесия газовой полости в периоды расширения и сжатия запишем

$$\bar{P}_a - P_{\text{ст}} = \frac{2\sigma_{\text{ж}}}{R_{\phi} + \Delta R'_{\phi}} \quad \text{и} \quad \bar{P}_a - P_{\text{ст}} = \frac{2\sigma_{\text{ж}}}{R_{\phi} + \Delta R''_{\phi}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{ж}}$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкости;

$P_{\text{ст}}$  - статистическое давление в рабочей камере ультразвуковой установки.

В этом случае превышение поверхности  $\Delta S_e$  входа газа при расширении газовой полости над поверхностью сжатия

$$\Delta S_e = 8\pi R_\phi (\Delta R'_\phi + \Delta R''_\phi).$$

С учетом значений  $\Delta R'_\phi$  и  $\Delta R''_\phi$  из формул (2)

$$\Delta S_\Gamma = 32\pi\sigma_{ж} R_\phi \frac{\bar{P}_a}{\bar{P}_a^2 - P_{ст}^2}. \quad (3)$$

Движущей силой выправленной диффузии является градиент концентрации газа, который создается ультразвуковой волной, поэтому пропорционален  $\bar{P}_a$  и коэффициенту растворимости газов  $\beta_\Gamma$

$$\frac{\partial P_\Gamma}{\partial R_\phi} \approx \beta_\Gamma P_\Gamma \frac{\bar{P}_a}{R_\phi}.$$

С учетом полученных значений  $\Delta S_\Gamma$  и  $\partial P_\Gamma / \partial R_\phi$  закон диффузии Фика (1) может быть записан в виде

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = 32\pi\sigma_{ж} P_\Gamma D_\Gamma \beta_\Gamma = \frac{\bar{P}_a^2}{\bar{P}_a^2 - P_{ст}^2}.$$

Отсюда следует, что односторонняя «выправленная» диффузия газов в пузырьках, находящихся в капиллярах, возможна только при  $\bar{P}_a > P_{ст}$ . Очевидно, что в какой-то момент из-за увеличения плотности газов в пузырьке он потеряет устойчивость и произойдет его деление.

Предположим, что частота деления количества пузырьков  $dN_\Gamma/dt$  пропорциональна темпу удаления осадка и приросту массы загрязнений  $\Delta m_\Gamma/m_{\Gamma,0}$  в рабочем объеме  $V_y$  ультразвукового излучателя

$$\frac{\Delta N_e}{dt} = \frac{\Delta m_\Gamma}{m_{\Gamma,0}} = 32\pi\sigma_{ж} \frac{D_\Gamma \beta_\Gamma}{V_{yc}} \cdot \frac{\bar{P}_a^2}{\bar{P}_a^2 - P_{ст}^2}. \quad (4)$$

Колеблющийся вместе с присоединенной массой жидкости пузырек при делении образует, как известно, кумулятивную струю жидкости, которая способствует отрыву частиц загрязнений. Частота деления пузырьков в капиллярах должна быть равна частоте кавитационных воздействий и микроразрушений твердого тела. Например, частота микроразрушений, оцениваемая по следам вмятин кавитационных пузырьков на латунной или алюминиевой фольге, при частоте ультразвука 20 кГц приблизительно равна 700 ударам в минуту [1].

Определим массу  $\Delta M_\Gamma$  разрушенного кавитацией осадка в виде твердого тела [2]

$$\Delta M_\Gamma = a_2 E / w_{зв},$$

где  $E$  – энергия кавитационных пузырьков;

$a_2$  – физическая постоянная, зависящая от прочности материала твердого тела;

$w_{зв}$  – скорость звука в твердом теле.

Энергия кавитационных пузырьков в капиллярах размером  $R_\phi$

$$E_k = 4/3 (\bar{P}_a + P_{ст}) R_\phi. \quad (5)$$

Логично предположить, что относительная величина убыли массы загрязнителя в капиллярах пропорциональна числу актов деления пузырьков за то же время

$$\frac{\Delta M_\Gamma}{M_\Gamma \Delta t} = \frac{a_3 E_k}{w_{зв}} \cdot \frac{dN_\Gamma}{dt} = \frac{128}{3} \pi R_\phi \frac{\sigma_{ж} \beta_\Gamma D_\Gamma}{V_{yc}} \cdot \frac{\bar{P}_a^2}{\bar{P}_a - P_{ст}} = \lambda, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – интенсивность процесса;

$a_3$  – нормирующий множитель.

Вероятно, кроме кавитационного разрушения осадка в капиллярах фильтроэлементов, возможно движение осадка как вязкопластичного слоя. Действительно, колеблющаяся поверхность газового пузырька с пульсационной скоростью  $w$  создает касательное напряжение

$$\tau_{кр} = \mu_{ж} \Delta w / \Delta h,$$

где  $\mu_{ж}$  – динамическая вязкость жидкости;

$\Delta h$  – толщина вязкопластичного слоя.

Известно [2], что при достижении критического значения касательного напряжения, например у строительного гудрона марки 2М-31, равного  $\tau_{кр} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ , начинается полслойное движение гудрона. Очевидно, в этом случае потребная скорость  $w$  моющей жидкости в капиллярах определяется по формуле

$$w = \tau_{кр} (\Delta h / \mu_{ж}).$$

Учитывая, что растворение газов в неметаллах или вязкопластичном веществе происходит без диссоциации молекул газа, значение коэффициента диффузии  $D_e$  по порядку величин

$$D_e = w \Delta h = (\tau_{кр} \Delta h^2 / \mu_{ж}) = (\tau_{кр} R^2 / \mu).$$

Окончательное значение интенсивности процесса ультразвуковой очистки фильтроэлементов с учетом полученного значения  $D_e$

$$\lambda = \frac{128}{3} \pi R^3 \frac{\sigma_{ж} \beta_r}{\mu_{ж}} \cdot \frac{\tau_{кр} R^2}{V_y} \cdot \frac{\bar{P}_a^2}{\bar{P}_a - P_{ст}}. \quad (7)$$

Очевидно, величина  $\lambda$  является постоянной при данных параметрах ультразвукового поля и типе фильтроэлемента и определяет интенсивность процесса регенерации.

Убыль массы загрязнений  $\Delta M_T$  освобождает в капиллярах объем  $L_\phi 2\pi R_\phi dR_\phi$ , а вся масса  $M_T$  занимала объем

$$L_\phi = \pi (R_{\phi,o}^2 - R^2),$$

где  $R_{\phi,o}^2$  - первоначальный радиус чистого капилляра.

Тогда

$$\frac{2R_\phi dR_\phi}{R_{\phi,o}^2 - R_\phi^2} = \lambda dt.$$

Интегрируя в пределах  $t = 0$ ,  $R_\phi = R_{\phi,o}$  и  $t = t$ ,  $R_\phi = R_\phi$  и учитывая, что

$$K_{n,o} \approx \Sigma R_{\phi,o}^2; \quad K_n \approx \Sigma R_\phi^2,$$

получаем выражение

$$K_n / K_{n,o} = 1 - \exp(-\lambda t), \quad (8)$$

где  $K_{n,o}$ ,  $K_n$  - начальные и текущие значения проницаемости материала, которое хорошо описывает кинетику процесса очистки фильтроэлементов в ультразвуковом поле.

Полученные формулы (6) и (8) позволяют решить важнейшую технологическую задачу выбора оптимального соотношения  $P_a / P_{cm}$ , когда происходит увеличение эффективности кавитационного разрушения твердых тел на 1 – 2 порядка. Для этого продифференцируем уравнение (6). Оптимальное соотношение  $P_a / P_{cm}$  должно соответствовать максимальному значению параметра  $\lambda$

$$\frac{2\bar{P}_a(\bar{P}_a - P_{cm}) - \bar{P}_a^2}{(P_a - P_{cm})} = 0,$$

откуда

$$\lambda_{max} = P_a / P_{cm} = 0,5. \quad (9)$$

На практике это оптимальное соотношение  $\bar{P}_a / P_{cm} = 0,3 - 0,4 \approx P_a / P_{cm}$ . Полученное критерийное соотношение  $P_a / P_{cm}$  значительно точнее  $P_a / P_{cm} = 0,1 - 0,8$  указанного в теоретических работах [1; 2]. Этот критерий позволяет точно определять возможность создания оптимального избыточного давления на ультразвуковом оборудовании.

Практика показывает, что при оптимальном соотношении  $P_a / P_{cm} = 0,4$  время очистки сокращается в 4 раза по сравнению с обработкой на обычном ультразвуковом оборудовании без повышения статического давления. С погрешностью 10 – 30% это соотношение справедливо для всех типов испытанных моющих жидкостей. Следует также учесть, что продукты загрязнения фильтроэлементов на 20 – 60% состоят из липкого подслоя и продуктов окисления рабочей

жидкости. Дифференцируя уравнение (2), получаем формулу для определения максимального значения радиальной скорости жидкости на поверхности пузырька

$$\frac{dR_\phi}{dt} = w_{a \max} = \frac{P_a \omega \cos \omega t}{3\sigma_{ж}} R_\phi^2. \quad (10)$$

Так как в осадке содержится много органических веществ, правомерно рассматривать процесс удаления этого осадка как течение а вязкопластичного слоя, имеющего вязкость  $\mu_{сл}$ . Очевидно, что напряжение трения в жидкости

$$\tau = \mu w / \delta_{ак},$$

где  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости;

$\delta_{ак}$  - толщина пограничного слоя в акустическом поле. Ее величина обычно на 1...2 порядка меньше толщины гидродинамического пограничного слоя.

Напряжение  $\tau$  действует по всей толщине  $h_{сл}$  вязкопластичного слоя, в результате чего верхний слой осадка начнет двигаться со скоростью

$$\frac{dh_{сл}}{dt} = \tau \frac{h}{\mu_{сл}} = \frac{\mu}{\mu_{сл}} \cdot \frac{w}{\delta_{ак}} h.$$

Решение последнего уравнения с учетом формулы (10) дает возможность описать закон изменения толщины вязкопластичного слоя осадка в ультразвуковом поле в виде

$$h_{сл} = h_{сл,0} \exp \left( - \frac{\mu P_a \omega \cos \omega t R_\phi^2}{\mu_{сл} 3 \sigma_{ж} \delta_{ак}} \right), \quad (11)$$

где  $h_{сл,0}$  - начальная толщина слоя осадка.

Проницаемость загрязненных капилляров со слоем осадка толщиной  $h_{сл}$  в момент времени  $t$  равна

$$K_n \approx \pi R_\phi^2 \left( 1 - \frac{2h_{сл}}{R_{\phi,0}} \right).$$

Подставляя из формулы (11) значение  $h_{сл}$ , окончательно имеем

$$K_n / K_{n,0} = 1 - \frac{2h_{сл,0}}{R_{\phi,0}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{\mu_{жс} \bar{R}_a \omega R_\phi^2}{\mu_{сл} 3 \sigma_{ж} \delta_{ак}} t \right) \right]. \quad (12)$$

Таким образом, оба рассмотренных механизма ультразвуковой очистки фильтроэлементов описываются практически аналогичными формулами (8) и (12), что свидетельствует о правомерности сделанных предположений.

Другой важный вывод получаем, подставляя в уравнение (12) полученное значение из уравнения (11). При постоянных параметрах ультразвукового поля, неизменной природе загрязнений и типе моющей жидкости из формулы (8) следует, что

$$R_{\phi,0}^2 = \text{const}. \quad (13)$$

Соотношение (13) позволяет научно обоснованно назначать такой важный технологический параметр, как время полной очистки фильтроэлемента другой тонкости фильтрации.

Опыты показали, что эффективным способом очистки фильтроэлементов (ФЭ) является создание статического давления за счет принудительного потока моющей жидкости. При этом принудительный противоток моющей жидкости через промываемый фильтроэлемент обеспечивает не только сохранение оптимального температурного режима, но и вынос загрязнений из капилляров.

В соответствии с результатами проведенного анализа можно создать критерий комплексной оценки  $K^*$  для сравнения эффективности разных моющих жидкостей по их физическим параметрам  $\sigma, \mu$ , и  $\beta$ . Следует иметь в виду, что при одинаковой степени очистки  $K_n / K_{n,0}$  из уравнения (8) следует соотношение

$$K^* = \sigma \beta / \mu = \text{const}.$$

Величину  $\lambda$  из формулы (8) можно рассматривать как показатель поглощаемой ультразвуковой энергии в жидкости в единицу времени. Очевидно, что чем больше значение  $\lambda$ , тем интенсивнее идет процесс ультразвуковой очистки.

Сравним по предложенному критерию комплексной оценки наиболее часто применяемые моющие жидкости (табл.1).

Таблица 1

Характеристики применяемых моющих жидкостей с учетом рабочих температур

Тип моющей жидкости	Параметры жидкости			Критерий $K^* = \beta/\mu$ , м/с	Давление насыщенного пара $P_{нап}$ , Па
	Коэффициент растворимости газов $\beta$ , %	Критерий динамической вязкости $\mu$ , Па · с · 10 <sup>-3</sup>	Коэффициент поверхностного натяжения $\sigma$ , Н/м · 10 <sup>-3</sup>		
Водные растворы при $t = 20 - 60^\circ\text{C}$	0,20...0,14	1...0,98	70...50	700...500	2260...21280
Гидромасло АМГ-10 при $t = 20 - 60^\circ\text{C}$	0,10...0,08	20...8	36...30	18...37,5	2660...4000
Авиакеросин $t = 20 - 35^\circ\text{C}$	0,13...0,11	40...20	28...20	70...100	3300...6600

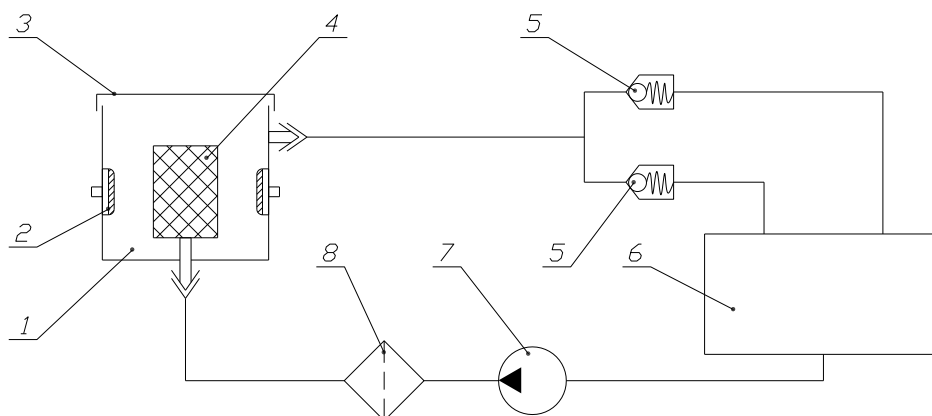
Критерий комплексной оценки у авиакеросина при  $35^\circ\text{C}$  почти в 5 – 10 раз ниже, чем у водных растворов ТМС при обычно рекомендуемой для них рабочей температуре  $60 - 70^\circ\text{C}$ .

Однако следует учесть рост давления насыщенных паров  $P_{нап}$  жидкости с ростом ее температуры, что ведет к уменьшению эрозионной активности, поэтому можно предложить комплексный критерий  $K^*$  оценки моющих свойств жидкости в виде

$$K^{**} = K^*/P_{нап}.$$

Этот критерий при оптимальных требуемых рабочих температурах для водных моющих растворов составляет 0,33 – 0,027, для авиакеросина – 0,022 – 0,016.

Наибольшее распространение в гражданской авиации получила ультразвуковая установка типа МУЗУ1-0Д6 (рис. 1).



**Рис. 1.** Принципиальная схема ультразвуковой установки МУЗУ1-0Д6: 1 – рабочий корпус; 2 – пьезокерамические излучатели ультразвука (8 шт.); 3 – герметичная крышка; 4 – очищаемый фильтроэлемент; 5 – подпорные клапаны; 6 – бак; 7 – центробежный насос; 8 – фильтроэлемент из наноматериала

Таким образом, с учетом реальных температурных условий ультразвуковой очистки авиакеросин по комплексному критерию  $K^*$  уступает водным моющим растворам всего в 1,68 раза. Учитывая важные требования экологии, удобства утилизации, стойкости, а также возможности реализации простой и дешевой системы охлаждения – нагрева моющей жидкости, приоритет при ультразвуковой очистке следует отдать применению авиакеросина, а при выборе ультразвуковых установок – установке типа МУЗУ1-0Д6 мощностью 1,5 кВт и массой 96 кг, имеющей прочную герметичную рабочую камеру для создания избыточного статического давления с одновременной циркуляцией авиакеросина от центробежного насоса мощностью 0,9 кВт.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физика и техника мощного ультразвука (в 3-х томах) Под редакцией Л.Д. Розенберга. Издательство "Наука", Москва, 1967 г. Книга 1. "Источники мощного ультразвука", 1967 г. - 380 с.
2. Комаров В.Г., Тимиркеев Р.Г. Ультразвуковая очистка металлических фильтроэлементов гидротопливных систем// Авиационная промышленность. – 2009. - № 2. – с. 30-34.

#### ENSURING OF THE EFFECTIVE AND HIGT-QUOLITY ULTRASONIC CLEANING OF HYDROFUEL SMALL-CAPILLARY FILTERING ELEMENTS

Komarov V.G., Timerkeev R.G.

The article considers the physical nature of the ultrasonic cleaning of small-capillary filtering elements of hydraulic and fuel systems of modern aircraft. The physical nature of filtering elements cleaning processes is the influence of the detergent liquid of gas bubbles in the oscillation frequency the unilateral gas diffusion on effectiveness of and on the flow of the filtering elements viscoplastic contamination layer.

**Keywords:** filtering element, cavitation bubbles energy, cumulative fluid stream, shearing stress in the viscoplastic layer.

#### Сведения об авторах

**Комаров Валерий Григорьевич**, 1954 г.р., окончил ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (1984), доцент, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского испытательного отдела НИЦ «ЦНИИ ВВС» Минобороны России, автор более 150 научных работ, область научных интересов - аэродинамика и динамика полета летательных аппаратов, эксплуатация и поддержание летной годности воздушных судов.

**Тимиркеев Ренат Гарифович**, 1937 г.р., окончил УАИ (1959), профессор, доктор технических наук, советник генерального директора ОАО «НИАТ», автор более 100 научных работ, область научных интересов - технология сборки и надежность гидротопливных систем летательных аппаратов, эксплуатация и поддержание летной годности воздушных судов.